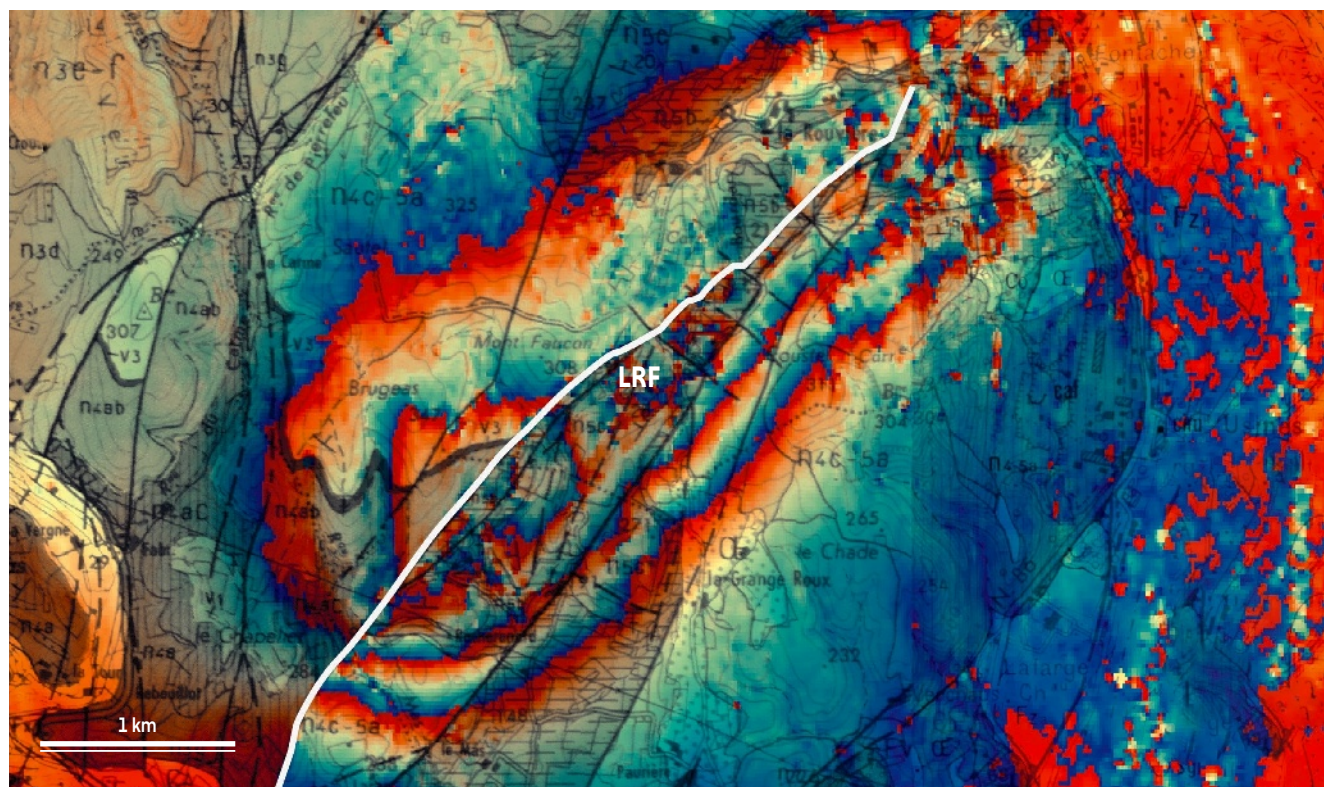




UNE AFFAIRE DE MAGNITUDE

La magnitude quantifie l'énergie libérée lors d'un séisme, c'est-à-dire lors d'un glissement soudain le long d'un plan de faille, sous forme d'ondes sismiques quiradient au-delà de la zone de glissement. Facile à définir, le paramètre est néanmoins difficile à déterminer, car il est inaccessible à une mesure directe. On le calcule à partir des signaux enregistrés par les stations sismologiques.

La magnitude dite « de Richter » ou magnitude locale M_L est calculée en fonction de l'amplitude maximale d'une partie des ondes mesurées sur un sismomètre et de la distance de ce sismomètre à l'épicentre. Toutefois, les valeurs de M_L annoncées diffèrent parfois selon les instituts de géophysique, car ils n'utilisent pas toujours les mêmes réseaux de stations sismologiques ni les mêmes instruments. D'autres problèmes, comme la saturation du signal lors de forts séismes, compliquent également le calcul de la magnitude locale. Pour toutes ces

raisons, les sismologues préfèrent la magnitude de moment M_w . Elle est obtenue par une analyse plus complète du signal sismique, qui reflète plus fidèlement l'énergie de la rupture libérée pendant le séisme. Cette méthode s'affranchit des difficultés rencontrées avec la magnitude locale et livre des valeurs plus homogènes.

Autre intérêt, la magnitude de moment aide à estimer les paramètres physiques de la rupture sismique comme la surface de la rupture (en kilomètres carrés) et l'amplitude du déplacement au niveau de celle-ci (en mètres). En conséquence, les experts sont en mesure de faire le lien entre la magnitude de moment et des relevés effectués en surface sur le terrain par les géologues. Par exemple, à partir de la longueur de la rupture, juste après un séisme ou très longtemps après, dans le cas d'études paléosismologiques, on obtient une estimation de la magnitude du tremblement de terre.

L'interférogramme obtenu à l'aide des données du satellite *Sentinel-1* compare une image pré-séisme à une autre post-séisme. Les lignes noires correspondent à des failles, et la ligne blanche définit la section nord de la faille de La Rouvière (LRF). Les franges d'interférence apparaissent là où un mouvement vertical a été détecté par le satellite à raison d'une frange (du bleu au rouge) par déplacement de trois centimètres. Ainsi, le bloc sud-est s'est soulevé d'environ 12 centimètres (4 franges) et le bloc nord-ouest s'est affaissé de 6 centimètres (2 franges dans l'autre sens).

entre une image présismique datant du 31 octobre et une autre postsismique datant du 12 novembre (voir la figure ci-dessus) a confirmé l'existence d'une rupture sismique très proche de la surface sur une longueur d'environ 5 kilomètres, orientée nord-est sud-ouest, correspondant à la moitié nord de la faille de La Rouvière. Cet interférogramme a également révélé que le bloc situé au sud-est s'était soulevé par rapport au bloc situé au nord-ouest, avec un décalage vertical compris entre 10 et 15 centimètres.

En utilisant des images satellites prises à 6 jours d'intervalle, plutôt que 12, les sismologues ont calculé un interférogramme plus précis, à partir duquel la composante verticale du déplacement a été déterminée plus précisément. De la sorte, ils ont repéré les gradients de déplacement les plus forts, interprétés comme étant associés à une rupture du sol. Le plus fort gradient de déplacement vertical est bien localisé le long de la faille de La Rouvière. Ils ont alors construit un

- profil de distribution du déplacement vertical le long de la faille à partir de quatorze coupes perpendiculaires. La déformation est plus importante et plus localisée dans la partie sud de la faille, avec un déplacement vertical maximum de 23 centimètres. Dans la partie nord, la déformation de surface est répartie sur une zone plus large, de 100 à 600 mètres, avec un déplacement vertical maximum de 13 centimètres. Comment ces déformations se sont-elles traduites en surface?

À LA RECHERCHE D'INDICES

Grâce à des analyses radar (InSAR), les premières traces en surface du séisme ont pu être découvertes 48 heures après le tremblement de terre (voir la figure ci-contre). Compte tenu de la densité de végétation qui couvre une grande partie de la région autour de l'épicentre, ces recherches se sont concentrées sur les routes et les chemins traversant la faille de La Rouvière, sur laquelle se calquait la ligne de discontinuité observée dans les données InSAR. Pour évaluer la continuité de la rupture sous le couvert forestier, un levé topographique par lidar (une sorte de radar utilisant de la lumière plutôt que des ondes radio) aéroporté a complété les investigations sur le terrain. Les traces repérées correspondent principalement à des fissures ouvertes ayant une orientation nord-est sud-ouest. Au total, une vingtaine d'indices ponctuels ont été observés sur une longueur de 4,5 kilomètres, le long de l'escarpement qui marque la faille de La Rouvière dans le paysage. Ils confirmaient que la rupture sismique associée au séisme du Teil s'est bien produite le long de cette faille ancienne.

Les indices les plus clairs ont été mesurés avec un scanner laser terrestre, révélant un soulèvement du sol compris entre 2,5 et 13 centimètres. C'est un peu moins de la moitié du déplacement estimé à partir de l'analyse InSAR, ce qui suggère que plus de 50% de la déformation s'est répartie à côté de la faille dans une zone de 100 à 600 mètres de largeur. Précisons que, compte tenu de l'inclinaison de la faille, les 2,5 à 13 centimètres précédents correspondent en fait à un déplacement total en surface le long de la faille compris entre 5 et 25 centimètres.

Une coupe géologique éclaire la relation entre l'ancienne faille normale (c'est-à-dire un plan incliné séparant deux compartiments rocheux) datant de l'Oligocène (il y a 20 à 30 millions



Le séisme du Teil s'est manifesté par diverses modifications géomorphologiques comme ce petit escarpement de faille recoupant une piste forestière. La petite tranchée creusée perpendiculairement à l'escarpement montre le plan de rupture plongeant vers la gauche.

d'années), et la rupture sismique associée au séisme du Teil qui fait rejouer cette faille dans un mouvement inverse (voir la figure page ci-contre). Cette coupe géologique montre que les différentes failles composant la terminaison nord-est du système des Cévennes correspondent à d'anciennes failles normales. L'examen des principales unités sédimentaires montre que le processus d'inversion est très jeune et très lent.

EFFACÉ DU PAYSAGE ?

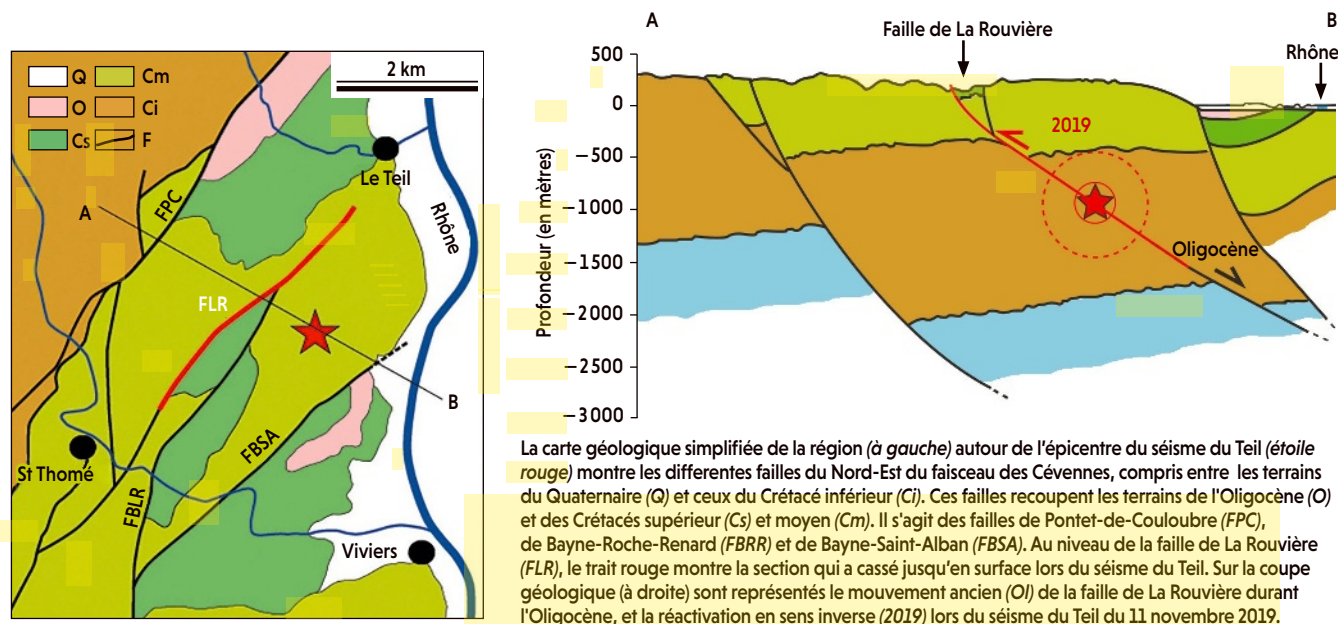
Toutes ces observations montrent que le séisme du Teil est associé à la réactivation de la faille de La Rouvière dans sa partie superficielle. Une des particularités de l'événement est sa remarquable rupture de surface. À l'échelle mondiale, un événement de si faible magnitude a une très faible probabilité (inférieure à 10%) de rompre la surface, mais la superficialité du foyer

explique ce phénomène rare. La faille de La Rouvière n'a pas été précédemment identifiée comme active, car elle ne présentait aucune sismicité notable détectable par des instruments. De même, aucune expression géomorphologique, c'est-à-dire aucun élément du paysage, ne trahissait une activité tectonique postérieure à l'Oligocène.

L'absence de preuves géomorphologiques avant le séisme du Teil suggère que la faille n'avait pas rompu la surface depuis longtemps, c'est-à-dire plusieurs centaines voire milliers d'années. Peut-être est-ce dû à de très longs intervalles de temps entre les séismes du fait du très faible taux de déformation qui caractérise la France métropolitaine. Ainsi, dans la partie sud-est du Massif central, ce taux de déformation annuel correspond à un raccourcissement de 0,1 millimètre sur 10 kilomètres de distance (200 fois moins vite que dans l'Himalaya) : imaginez-vous dans un étau de 10 kilomètres de large dont les deux mâchoires se rapprochent de 0,01 millimètre chaque année! C'est très lent.

Il est donc possible que des ruptures ayant atteint la surface par le passé aient été effacées du paysage par l'érosion. De plus, si l'on suppose que la déformation est répartie sur différentes failles du système cévenol, et donc diluée en quelque sorte, la préservation de marqueurs géomorphologiques tels que des escarpements de failles est encore plus improbable.

L'ensemble de ces éléments soulève plusieurs questions importantes quant à l'estimation de l'aléa sismique dans les régions comme



la France métropolitaine et plus généralement l'Europe de l'Ouest. La première est de se demander si les failles ou segments de failles composant le système nord-est cévenol, incluant la faille de La Rouvière, avaient déjà rompu ces derniers millions d'années, et, le cas échéant, avec quelle magnitude. Pour répondre, plusieurs études sont nécessaires. D'abord, une imagerie géophysique profonde aidera à localiser ces structures en profondeur, à définir leurs géométries, leurs dimensions et leur capacité à produire des tremblements de terre de magnitude supérieure à 6. En parallèle, des études paléosismologiques renseigneront sur l'âge des séismes anciens dont on déduira un intervalle de récurrence moyen, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre deux séismes ayant provoqué des ruptures de surface. L'objectif de ces travaux est d'améliorer le modèle de failles utilisé dans les analyses de risque sismique.

UN RISQUE À RÉÉVALUER

De plus en plus, le risque de rupture en surface est considéré comme une menace importante pour les infrastructures et les installations sensibles dont la tolérance aux instabilités du sol est très faible. En France et dans les zones intra-plaques avoisinantes, ce risque est rarement pris en compte. Pourtant, il existe bien, comme le montre le cas du séisme du Teil. Aujourd'hui, cet aléa est essentiellement analysé à partir d'approches empiriques pour anticiper la localisation et l'amplitude du glissement localisé le long d'une faille active en surface. Un couloir sécurisé où toute infrastructure sensible serait proscrite, ou au moins adaptée, peut être défini autour de la faille sismique ainsi répertoriée. Mais toutes ces approches empiriques souffrent de la rareté des données, notamment dans la plage des magnitudes faibles à modérées.

Enfin, le rôle même des processus tectoniques à long terme, s'étalant sur plusieurs centaines de millions d'années, liés aux mouvements des plaques lithosphériques lointaines, est remis en question. En effet, la France métropolitaine ainsi que ses pays voisins de l'Europe de l'Ouest correspondent à des régions continentales stables, où nous l'avons vu, les taux de déformations sont très faibles. Et il n'est pas impossible que la sismicité de ces régions soit davantage liée à d'autres types de mécanismes « tectoniques » qui s'expriment à plus court terme que la tectonique des plaques. Des études récentes suggèrent par exemple que le champ de contraintes régnant actuellement dans la région où a eu lieu le séisme du Teil serait lié au soulèvement du Massif central et des Alpes induit par des processus d'érosion ou consécutif à la fonte des glaces lors de la dernière déglaciation il y a entre 15 000 et 18 000 ans (on parle de rebond postglaciaire). Résoudre ces problèmes géodynamiques requiert l'acquisition de données géologiques et géophysiques supplémentaires ainsi que la mise en œuvre de nouveaux modèles. En d'autres termes, plus les experts acquerront des connaissances, plus ils seront en mesure d'être précis dans la détermination de l'aléa sismique.

Alors seulement, on pourra vraiment savoir si à l'instar de la faille de La Rouvière, il existe en France, par exemple dans le Massif armoricain, les Alpes, les Pyrénées, les Vosges... d'autres failles anciennes, capables de produire des séismes avec ruptures de surface. Rappelons que la métropole compte une dizaine de grandes zones de failles. Plusieurs projets en cours visent à réévaluer la sismicité dans les zones intracontinentales stables pour, à terme, redessiner la carte des failles actives en France. ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-F. RITZ ET AL., Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France, *Commun. Earth & Environ.*, pp. 10, 2020.

K. MANCHUEL ET AL., The French seismic CATALOGUE (FCAT-17), *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 16, pp. 2227-2251, 2018.